

Evaluación de exactitud posicional horizontal y vertical de la Cartografía Oficial a escala 1:50.000

Ing. Agrim. Rodolfo Méndez Baillo
mendezbaillo@gmail.com
Servicio Geográfico Militar - URUGUAY

Dr. Ing. Carlos López Vázquez
carlos.lopez@thedigitalmap.com
LatinGEO – Sede Uruguay

RESUMEN

El territorio uruguayo está cubierto por 300 cartas a escala 1:50.000 las cuales han sido confeccionadas en distintas épocas por el Servicio Geográfico Militar (SGM) por lo que no tienen un linaje uniforme. Décadas atrás, la comprobación de la exactitud planialtimétrica de una carta, era una tarea difícil, con una complejidad comparable a la determinación de puntos de control geodésico. Por razones varias (técnicas, logísticas, etc.) ello estaba vedado prácticamente a todos los usuarios. Con el advenimiento de la tecnología de posicionamiento satelital, y siendo ésta de bajo costo para muchas aplicaciones, el hecho de auditar o controlar un documento cartográfico pasa a ser factible incluso para usuarios individuales. Esto ha puesto en la obligación técnica al productor, sin más demoras, de publicar las exactitudes que tienen las cartas, así como los metadatos correspondientes a cada documento. En el largo plazo se apunta a que la publicación de una carta determinada tenga asociada siempre el indicador de su exactitud posicional (vertical u horizontal), quedando como siempre bajo responsabilidad del usuario el uso que haga del documento.

En el marco del renovado impulso de la IDE-UY es necesario conocer bien las características de la información disponible, y en particular, la cartografía oficial. El SGM ha iniciado un proceso de evaluación de su cartografía 1:50.000 para obtener la exactitud vertical y horizontal aplicando el *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA). Para evaluar la totalidad de la cartografía se aplicarán conceptos estadísticos que permitan elegir un número representativo de láminas según los distintos linajes presentes en el Plan 1:50.000.

Palabras clave: exactitud planimétrica, exactitud posicional

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) tiene como hipótesis que los datos disponibles pueden hacerse interoperables. Ello requiere una base cartográfica común, ampliamente aceptada y cuyas características técnicas sean conocidas. Entre los parámetros más significativos para asegurar la interoperabilidad puede encontrarse la exactitud planimétrica y altimétrica, especialmente si la cartografía debe utilizarse en conjunto con datos de campo de alta exactitud.

Según Atkinson (2005) no es frecuente la aplicación sistemática de medidas de exactitud por parte de productores oficiales, señalando como excepción el caso del IGN francés (que usa el estándar NMAS, descrito en Anon, 1947) y el Instituto Agustín Codazzi

(colombiano) que usa una variante propia. En Uruguay no ha habido un proceso sistemático de evaluación de la exactitud, si bien existen antecedentes aislados (Barbato, 1999 y 2002; Pérez-Rodino, 2000). Parece oportuno encarar una evaluación sistemática de las series oficiales y este artículo ilustra resultados preliminares obtenidos sobre cartografía 1:50.000 en papel.

2. ANÁLISIS DE LOS METADATOS DE LA SERIE

Existen muchos aspectos que conforman el linaje registrado en los metadatos. En realidad, todos los procesos forman parte de los mismos, desde el procedimiento de campo, instrumental utilizado, forma de procesamiento de los datos, vuelo fotogramétrico, método de aerotriangulación, proceso cartográfico, etc.

Documentar estos datos es de vital importancia, aunque no resulta sencillo evaluar en que grado influye cada uno en la exactitud posicional del producto cartográfico. De todas formas no es razonable hablar de un error posicional de una carta sin asociarlo a los procesos que forman parte de su génesis. En relación a los métodos de aerotriangulación y ajuste, en Uruguay y en la cartografía oficial 1:50.000 se reconocen los siguientes grupos:

- Ajuste SIMBA
- Ajuste Shut
- Ajuste Zarzicky
- Apoyo modelo a modelo de gabinete y triangulación radial
- Apoyo de campo modelo a modelo y triangulación radial
- Apoyo de campo modelo a modelo total

La descripción de cada uno de ellos está por fuera de los objetivos de este trabajo por lo que se remite al lector a las referencias especializadas (por ejemplo, Deagostini, 1990). Para la caracterización de la serie será necesario seleccionar casos representativos de cada linaje. A modo de ejemplo y con fines ilustrativos se decidió evaluar la serie 1:50.000 en formato papel, tomando como representativa la carta J-28 Pando. En lo que concierne al proceso de aerotriangulación, sus metadatos¹ declaran lo siguiente:

Restituída en el año 1975 con fotografías del año 1966 a escala a 40000.

Aerotriangulación: modelo a modelo de gabinete y triangulación radial.

Edición: cuarta

3. PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO – ESTÁNDAR NSSDA

El NSSDA (FGDC, 1998) es un estándar norteamericano usado por las agencias federales de los Estados Unidos que produzcan datos cartográficos analógicos o digitales. Emplea fuentes de mayor exactitud para la comparación de posiciones, pudiendo analizar las componentes horizontal, vertical, o ambas. Como primer paso se selecciona un mínimo de 20 puntos perfectamente definidos sobre la carta y se los mide con al menos 3 veces más exactitud que el error esperado. Hay algunos autores que cuestionan el número de puntos, y afirman que el 95% de confianza puede lograrse pero tomando en el orden de 100 mediciones (Ariza y Atkinson, 2008). En todo caso se comparan las coordenadas planas de los puntos homólogos, se calcula el error medio cuadrático (RMSE), y aplicando un coeficiente se llega a un valor de la exactitud de la muestra con

¹ <http://servicios.sgm.gub.uy/metadatos/meta/SGM/50.000.2/gabinete.fu/J-28.htm>

95% de nivel de confianza. Para esto se asumen hipótesis de independencia, homogeneidad espacial y normalidad. Habiendo aplicado el Test, se estará en condiciones de declarar que la exactitud posicional horizontal y/o vertical tiene cierto valor con un 95% de confianza.

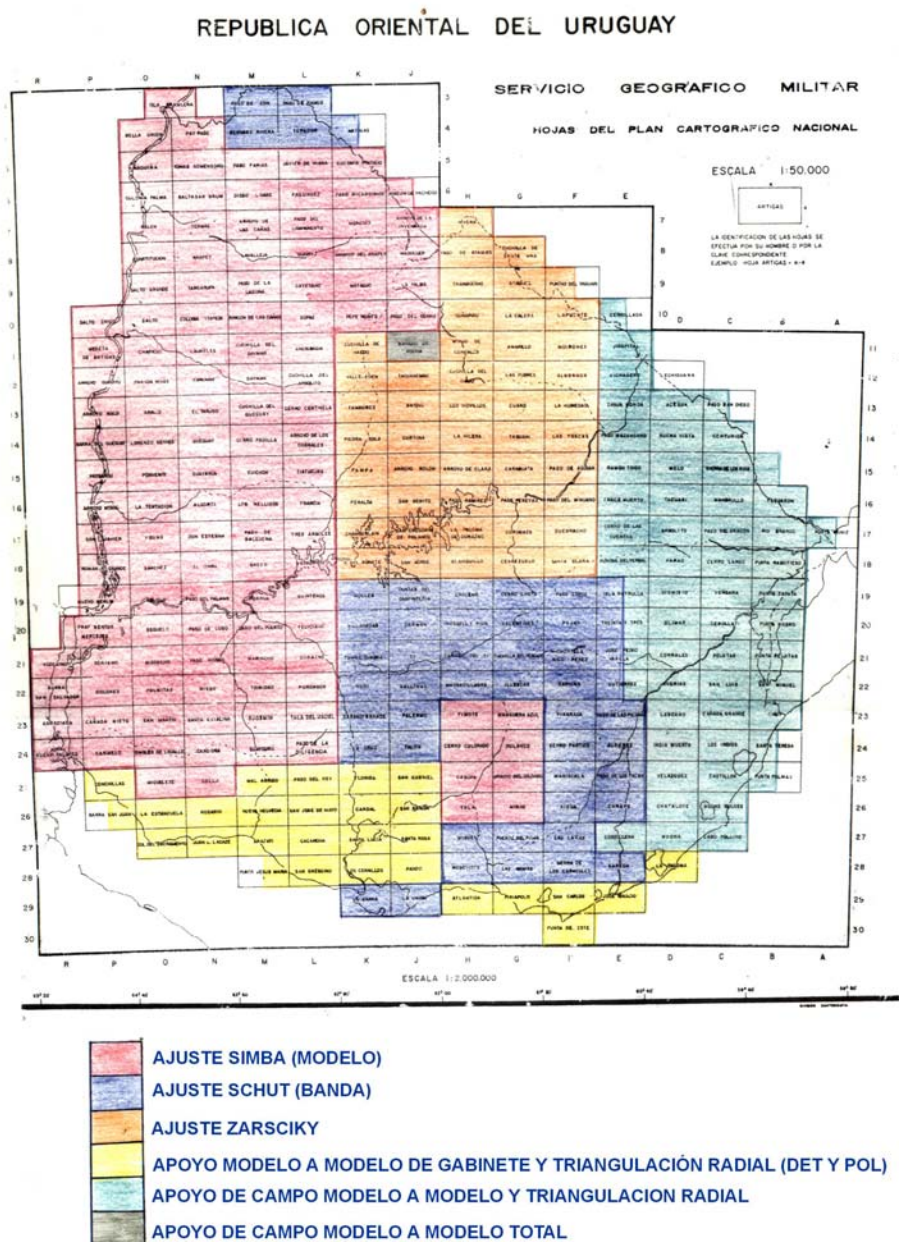


Figura 1 Disposición espacial de los diferentes métodos de aerotriangulación y ajustes utilizados para la elaboración de la cartografía clásica del SGM en papel a escala 1:50000

Es importante aclarar que el Test no rechaza o acepta una carta; simplemente declara su exactitud y queda a cargo del usuario decidir el uso que le dará a la misma. Existen otros estándares (Anon 2002; NMAS, 1947) que tienen otras políticas.

Del mismo modo, se declara si los errores tienen una distribución normal o si hay correlación entre las X y las Y, pero en cualquier caso, es posible aplicar el test.

Contemplando las indicaciones del NSSDA, se eligieron probables zonas para realizar las mediciones. Idealmente se pensó en elegir los quiebres, codos y T de alambrados, por considerarse un punto que no trae aparejada dudas para leer sus coordenadas en la carta, e identificable en el terreno.

Surgió sin embargo el problema de que en las cartas no aparecen todos los alambrados que físicamente se aprecian en el campo. Por un lado debe ser así por una cuestión de escala, pero además existe el detalle que sobre todo en zonas pobladas, la disposición de alambrados sufre importantes cambios por fraccionamientos, expropiaciones o cualquier otra modificación predial.

4. MATERIALES Y MÉTODOS DE CAMPO

Equipamiento a usar

Dado el error esperado de la muestra las mediciones podrían haberse realizado, al menos para la evaluación horizontal, con simples navegadores GPS. Dado que se quería con las mismas mediciones poder evaluar la exactitud vertical, se debió recurrir a receptores topográficos y geodésicos para poder obtener la cota con una altura que permitiera controlar la carta.

Trabajo de campo

Se estimaron 2 días de campo para tomar aproximadamente 40 puntos, trabajando con 2 equipos simultáneamente. El procedimiento consistió en que cada equipo colocara receptores en mojones de la Red Geodésica Nacional y usando el método diferencial poder relacionar las medidas sobre los puntos a la misma.

Es bueno aclarar que en el momento de que se realizaron las mediciones de campo, no estaban operativas las Estaciones Permanentes, ni había suficiente experiencia para usar el método de conexión en tiempo real vía celular

Dificultades en la elección de los puntos

Las dificultades que se encontraron en el terreno, estuvieron relacionadas con encontrar codos, T de alambre, o quiebres que fueran los homólogos de los puntos elegidos en la carta. Los cambios constatados en la disposición de los alambrados agregado a que, como se he mencionado, no todas las líneas de alambre se representan en la carta, hicieron muy dificultosa la ubicación de ese tipo de detalles.

Se decidió entonces que salvo los puntos de alambrado de fácil acceso o de elección inequívoca, los puntos que se tomarían serían los cruces de caminos secundarios. Esto facilitó y agilizó el trabajo de campo. Se evitaron los cruces de rutas, o rutas y caminos secundarios, ya que la simbolización de la carta no hace sencillo encontrar el punto definido por el cruce de los ejes.

5. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE CAMPO

Finalizadas las mediciones, los datos fueron procesados y se obtuvieron las coordenadas finales en coordenadas planas en el mismo sistema que utiliza la carta papel: Gauss-Krüger. A los efectos de la obtención de cotas ortométricas, se fijaron una o más alturas oficiales en mojones de las Redes Geodésicas ocupados por los receptores, se calcularon los desniveles relativos y se aplicó el modelo geoidal EGM 96. Cada punto medido en el campo, tiene su homólogo en la carta, siendo sus coordenadas leídas gráficamente en la misma.

Detección de outliers

Se aplicaron algunos criterios para detectar y eliminar los errores que por considerarse faltas o errores groseros, contaminan la muestra pudiendo falsear los resultados en el cálculo de exactitud.

Para localizar posibles errores groseros se utiliza la siguiente expresión:

$$|x_i - M| / \text{med}(|x_i - M|) > 5$$

Donde M es la mediana muestral y el denominador es la mediana de las desviaciones en valor absoluto a la mediana muestral.

Normalidad - Test de Kolmogorov - Smirnov

El estándar requiere que las discrepancias sigan una distribución normal. Para comprobar esta segunda hipótesis se utilizará el test de Kolmogorov-Smirnov. Dicho test compara la función de distribución acumulada de los datos con la de una distribución normal, midiendo la máxima distancia entre ambas curvas. Si la máxima distancia entre las curvas (estadístico unilateral de Kolmogorov-Smirnov, D_n^+) es superior al valor crítico del test ($d_{n^+, \alpha}$) la distribución de la muestra no es normal. El test de Kolmogorov-Smirnov otorga un peso menor a las observaciones extremas.

Correlación de errores en las coordenadas – Test de Spearman

El conocer si hay una alta correlación entre los errores en X y las Y, puede ayudar a concluir que existen errores sistemáticos, sin perjuicio que el estándar asume que no hay correlación entre ambas variables. En general ello debe confirmarse o desmentirse, aunque el estándar no especifica como hacerlo. El coeficiente de correlación de Spearman puede tomar valores entre -1 y 1 de forma que cuanto mas próximo es su valor a 0 menos correlacionadas están las variables. Si el coeficiente de correlación de Spearman toma un valor próximo a -1 las variables estarán correlacionadas negativamente y si el valor es próximo a 1 positivamente

$$(R^2) = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n^3 - n}$$

donde d^2 es cuadrado de las diferencias de los valores del 1 al n asignados a las variables ErrorX y ErrorY según su orden de mayor a menor.

6. RESULTADOS

De los 40 puntos disponibles se descartaron 2 medidas por considerarse outliers en relación a las coordenadas planas. Respecto de las cotas también fueron descartadas 2 medidas, aunque no son las mismas que se descartaron para la evaluación de la exactitud vertical. Según los test aplicados, se concluyó que los errores no tienen una distribución normal y no existe entre las variables X e Y un correlación que pueda dar argumentos para inferir algún sistematismo. El estándar no indica qué hacer ante la falta de normalidad, por lo que se ignoró ese requerimiento.

Tomando arbitrariamente un par de grupos de 20 puntos seleccionados de entre los 38 disponibles se aplicó el NSSDA obteniendo valores que variaron entre 85 a 105 metros exactitud horizontal. Del mismo modo fue calculada la exactitud vertical, obteniendo valores más cercanos entre sí; entre 5 y 6 metros de error. El estándar no provee directivas para dilucidar si esta variabilidad es debida al azar, o es una característica de la población de datos. Por ello se hicieron cálculos adicionales con la técnica del *bootstrap* (Efron, 1979). Se realizó en 20 ocasiones la selección de un punto al azar tomado del conjunto de 38 (técnica denominada *muestreo con reposición*). De esa forma se admite la repetición de puntos dato, lo cual no está previsto en el estándar (que pide una distancia entre puntos datos de al menos $C/10$, siendo C la diagonal de la ventana rectangular en la que caen los puntos dato). Con esos 20 puntos se calcula el estadístico del NSSDA, haciendo caso omiso a la distancia mínima entre puntos y a la distribución espacial (que pide un 20% del total en cada cuadrante).

Se repitió este procedimiento en 1000 ocasiones, resultando 1000 valores del estadístico NSSDA. Esa población muestra una distribución como la de la figura 2 (izquierda).

Obsérvese que no hubo eventos con menos de 70m ni más de 140m, y que la distribución luce casi normal tal como lo predice la teoría. El valor esperado está, con un 95% de confianza, en el intervalo [88,108], y la mediana en 100 m.

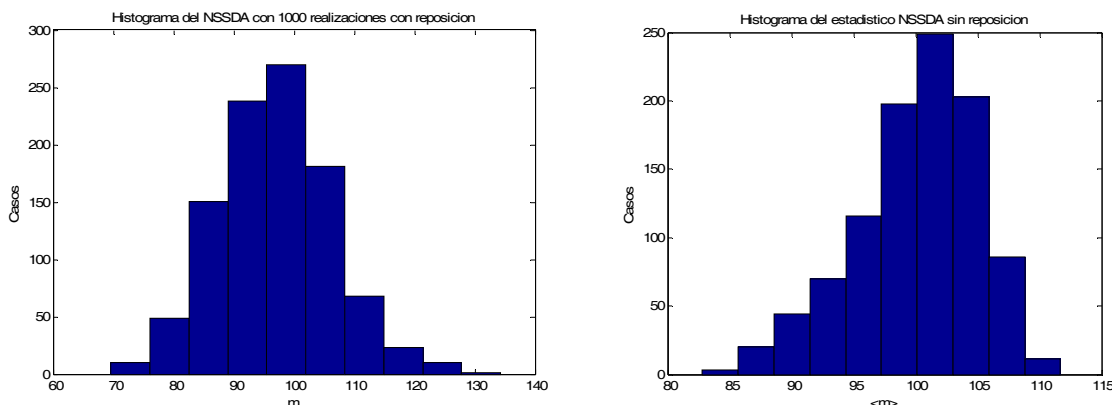


Figura 2 Valores del estadístico NSSDA tras 1000 experimentos. A la izquierda se seleccionaron 20 puntos con reposición, y a la derecha sin reposición.

Por otro lado, y para considerar (en parte) lo que pide el estándar se realizó el siguiente proceso:

- Repetir 1000 veces
 - Elegir al azar un primer punto entre los 38 disponibles
 - Repetir hasta completar 20 puntos
 - Elegir al azar un punto más, que diste de todos los anteriores no menos de $C/10$
 - Incorporarlo al conjunto
 - Calcular el estadístico NSSDA y guardarlo
- Construir el histograma

Al terminar se tiene 1000 valores posibles del estadístico NSSDA, aunque nuevamente ignorando algunas restricciones. El histograma se presenta en la figura 2 (derecha). Nótese que los valores están ahora entre 82 y 112 m, y que la distribución no es asimilable a una normal, confirmando visualmente lo informado por el test de Kolmogorov-Smirnov. El intervalo de confianza es ahora [78,117] (algo más amplio que el obtenido con bootstrap) mientras que la mediana es prácticamente 96 m.

Considerando lo anterior la declaración de las exactitudes de acuerdo al NSSDA para la carta J-28 quedaría de la siguiente forma (tras redondear los valores):

Comprobada para 100 metros de exactitud horizontal al 95% de nivel de confianza.

Comprobada para 5 metros de exactitud vertical al 95% de nivel de confianza

Según permite el estándar, podría realizarse una declaración similar para el resto de las cartas que hayan sido construidas con un procedimiento similar. Sin embargo, se necesitará mayor trabajo para confirmar la validez estadística de tal aseveración.

7. CONCLUSIONES

Los errores hallados y los que probablemente se encuentren en la cartografía 1:50.000, serán un indicador importante para el usuario. El mismo podrá prever si el uso de la carta es adecuado para el error que se declare, tanto en sentido vertical como horizontal. Desde el punto de vista del productor (en este caso el SGM) es importante poder brindar sobre la base de un producto ya existente como es la carta, una mejora desde el punto de

vista técnico, que incluso podría considerarse un producto cartográfico adicional. De hecho, conocer el error horizontal o vertical de una carta es un valor agregado que será apreciado por el usuario final y posiciona al productor de mejor forma. El productor se comprometerá a proporcionar los datos de exactitud ya que el propio usuario, sin formación específica en cartografía, puede controlar y verificar una posición de un mapa, con un receptor satelital de bajo costo.

No debe perderse la perspectiva de que 300 cartas que cubren el País han sido elaboradas en el correr de décadas, por lo que es esperable que no exista homogeneidad desde el punto de vista de la exactitud posicional.

La carta que ha sido evaluada presenta como ya se ha mencionado, una exactitud horizontal del orden de 100 metros y una exactitud vertical de 5 metros, siempre de acuerdo al NSSDA (1998). Estos resultados no deben ser analizados fuera del contexto del linaje de dicha carta. La misma fue obtenida con un método de aerotriangulación mecánico y que se sabía que tenía aproximaciones importantes. El método de aerotriangulación radial mecánica no fue inadecuado; simplemente era el procedimiento que se podía realizar en ese momento. Analizando los detalles del método, los errores obtenidos no deberían sorprender. Si por el contrario, el apoyo de campo hubiera sido realizado con receptores GPS doble frecuencia, y la aerotriangulación fueran informatizada, y se hubieran aplicado métodos robustos de ajustes, errores como los obtenidos serían inaceptables.

El estándar NSSDA (1998) no establece criterios de aceptación o rechazo de productos. De todas formas, se debe reconocer que por los errores constatados y considerando criterios de otros estándares (que relacionan escala nominal con exactitud, como NMAS, 1947) en lo referente a planimetría esta carta no sería adecuada para la escala 1:50.000, confirmando los resultados previos de Barbato (1999, 2002) y Pérez-Rodino (2000). En lo referente a altimetría, dado que el 90% de los puntos elevados tenían un error menor que 4.9 m, al comparar con la mitad de la distancia entre curvas de nivel (5 m en este caso), se puede concluir que la carta J-28 cumple el estándar NMAS (1947).

8. REFERENCIAS

Ariza López, F. J. y Atkinson, A. D. J. 2008 "Variability of NSSDA estimations". *J. Surv. Engrg.* V 134, N 2, pp. 39-44

Ariza López, F. J. y García Balboa, J. L. 2010 "Evaluación de las componentes de la calidad de la información geográfica". En *2ª Edición del Curso de Experto Universitario en Evaluación de la Información Geográfica*. Universidad de Jaén. Jaén, España.

Atkinson, A. D. J. 2005 "Control de calidad posicional en cartografía: análisis de los principales estándares y propuesta de mejora" *Tesis del Doctorado en Ingeniería Cartográfica Geodésica y Fotogrametría*. Universidad de Jaén. Jaén, España. 554pp.

Barbato, F. D. 1999 "Determinación de Parámetros de Precisión Cartográfica en Sistemas de Información Geográfica (G.I.S.)" *Revista de la Asociación de Agrimensores del Uruguay* AAU 14 pp.

Barbato, F. D. 2002 "Error Analysis in Cartographic Data with Application to the Geographic Information Systems", *ISPRS Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, 2002*, 12 pp.

Deagostini, D. 1990 "Introducción a la fotogrametría" Bogotá, Colombia : Centro Interamericano de Fotointerpretación.

Efron, B. 1979 "Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife". *The Annals of Statistics* 7, 1, pp. 1-26

NMAS, 1947 "United States National Map Accuracy Standard" *US Bureau of the Budget*. 1 pp.

NSSDA 1998, "Geospatial Positioning Accuracy Standards; Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy", *Federal Geographic Data Committee*, FGDC-STD-

007.3, Washington, D.C. 28 pp. (<http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3> accedido 20090414)

Pérez-Rodino, R 2000. 'Métodos Sencillos de transformación y ajuste de cartografía digital vectorial', *COBRAC 2000 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*, UFSC, Florianópolis, 15-19 de Octubre (<http://www.fing.edu.uy/ia/deptogeo/proyectos/Metodos.pdf> accedido 20100312)

STANAG, 2002. "Evaluation of land maps, aeronautical charts and digital topographic data" STANAG 2215, NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION, 29 pp.

9. RESEÑA BIOGRÁFICA

Rodolfo Méndez Baillo nació en Montevideo en 1967, habiéndose graduado como Ingeniero Agrimensor en 1999 por la Universidad de la República (Uruguay). Posee el título de Ingeniero Técnico en Topografía (España, 2005) y el de Especialista en Teledetección Aplicada a la Observación e Información Territorial (Universidad Politécnica de Madrid, 2008). A fines de 2007 comenzó los estudios de Doctorado en Agrimensura en la Universidad Nacional de Catamarca, Argentina. Desempeña tareas en el Servicio Geográfico Militar desde 1993, trabajando siempre en la División Geodesia, (hoy División Geodesia y Topografía). Desde fines de 2009 es docente Gr. 2 de las cátedras de Geofísica y Geodesia 2 de la carrera de Agrimensura, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. El CV completo y forma de contacto puede solicitarse a mendezbaillo@gmail.com

Carlos López nació en Montevideo en 1961, habiéndose graduado en Ingeniería Industrial en 1987 por la Universidad de la República (Uruguay). Su formación académica se complementa con un título de maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada (1993), y uno de doctorado relativo al control de calidad de datos geográficos, obtenido en 1997 en Estocolmo, Suecia. Es Docente Estable del programa de Doctorado en Agrimensura de la Universidad de Catamarca desde 2004, y del programa de Doctorado en Topografía de la Universidad Politécnica de Madrid también desde 2004. En su actividad profesional ha tenido a cargo la implementación del ClearingHouse Nacional de Datos Geográficos (Uruguay) así como la formulación del proyecto de la IDE de Uruguay para 2010-2020. En su actividad académica trabajó en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República desde 1986 hasta agosto del 2000 donde dictó cursos y dirigió varios proyectos (académicos y de investigación) así como grupos de trabajo. Fue director del Centro de Cálculo entre 1997 y 1999. Fue catedrático de Cálculo Numérico en el Universitario Autónomo del Sur desde 1998 hasta 2010. Actualmente está a cargo de la dirección del Laboratorio de Geomática en la Universidad ORT del Uruguay. Es Investigador Nivel I de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación de Uruguay, y director de la empresa The Digital Map Ltda. El CV completo, forma de contacto así como copia de sus tesis y la mayoría de sus publicaciones puede encontrarse en <http://www.thedigitalmap.com/~carlos>